

# 数値解析による多種類木質部材の火災後の燃え止まり性能予測に関する研究

## A study on the prediction of self-fire-extinguishing performance of several types of wood by numerical simulation

建築学専攻 原田研究室 孫 安陽(SUN ANYANG)

### 1. 研究の背景

「公共建築物等における木材の利用の推進に関する法律」が2010年に施行され、公共建築物における木材の利用が促進されている。しかし、木材は燃えやすいため、木造建築を建設する際は火災安全性能に対して十分に配慮する必要がある。大規模木造建築には特に厳しく要求され、主要構造部は火災が終了して常温に復帰するまで倒壊しない性能(非損傷性)と冷却過程に自ら燃焼を停止する性能(燃え止まり性)が求められる。

構造部材の耐火性能を検証するためには、耐火試験が広く適用されている方法である。しかし耐火試験では実験費用が高く、所要時間も長いなどの問題が指摘されている[1]。そのため、高効率・低費用で分析できる数値解析による木質構造部材の耐火性予測が望まれている。

### 2. 研究の内容と目的

本研究では燃え止まり予測解析の精度を向上し、かつ既存の燃え止まり解析プログラムを多種類の木材にも適用可能に改良することを目標とする。そのため、多種類の木質部材の熱分解速度をモデル化し、さらに加熱時の木質部材に発生する亀裂と収縮も分析する。最後に、測定で得られた物性を燃え止まりプログラム[1]に実装して解析を行う。

### 3. 多種類木材の熱分解速度のモデル化

#### 3.1 実験方法

各種類の木材の熱分解反応を検討し、熱分解速度を分析するため、5種類の軟木(カラマツ、ベイマツ、スギ化粧材、スギ構造材、ヒノキ)と4種類の堅木(ジャラ、セランガンバツ、本紫檀、縞黒檀)計9種類の木材に対して行われた熱重量分析(以下、TGA)のデータを分析した。TGAで使用した各種木材の密度は330~1260kg/m<sup>3</sup>である。

TGAでは各種木材の粉末を室温から900°Cまで窒素雰囲気中で5K/minの昇温速度で加熱した。カラマツでは5K/minと10K/minの2つの加熱速度の実験をした。

#### 3.2 実験結果

図1に5K/minの加熱速度で行なったカラマツとジャラの残量比が温度上昇による減少曲線(TG曲線)とTG曲線の微分(DTG曲線)を示す。

TG曲線とDTG曲線より、各樹種の熱分解反応による質量減少が発生する主要な温度区間は200~380°Cであることがわかった。

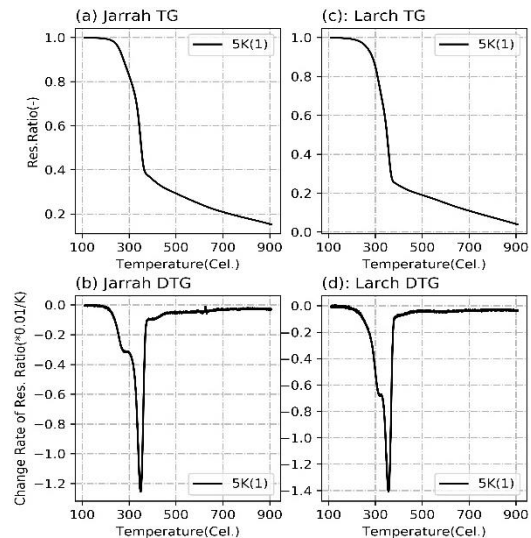
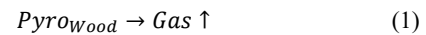


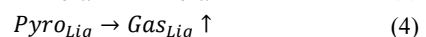
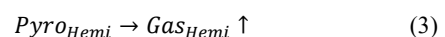
図1 ジャラ 5K(1)とカラマツ 5K(1)のTGとDTG[2]

### 3.3 分析手法

木材の熱分解反応は主に木材が含有する高分子化合物の分解反応である。その過程は非常に複雑であるが、簡単な反応モデルで近似する。本研究では、熱分解モデル化の時に常に使用される式(1)の単一過程モデルと式(2)~(4)の三成分モデルを用いた[3]。



ただし、 $Pyro_{Wood}$ は木材の揮発性成分、 $Gas$ は熱分解反応で生成した気体である。



ただし、添字の $Cel$ 、 $Hemi$ 、 $Lig$ は木材の主要組成成分であるセルロース、ヘミセルロース、リグニンを意味する。

熱分解反応をモデル化する時、まずは式(5)でTGAデータから転化率を計算する。

$$\alpha = \frac{r_0 - r_{res}}{r_0 - r_{char}} \quad (5)$$

ただし、 $r_{res}$ は転化率計算時の残量比、 $r_0$ は熱分解反応開始時の残量比(=1)、 $r_{char}$ は可分解質分解が終了した時の残量比である。

次に反応速度式で転化率の変化速度を表わす。

$$\frac{d\alpha}{dt} = (1 - \alpha)^n A e^{-\frac{E}{RT}} \quad (6)$$

ただし、 $A$ は頻度因子[s<sup>-1</sup>]、 $E$ は活性化エネルギー[J/mol]、 $R$ は気体定数(=8.314 J/mol・K)、 $n$ は反応次

数、 $T$ は温度[K]である。 $E$ 、 $A$ 、 $n$ は速度パラメータと呼ばれる定数である。

### 3.4 単一過程モデルによる熱分解モデル化

単一過程モデルで熱分解反応をモデル化する際、Freeman-Carrollの方法[4]を使用して各種類の木材の熱分解反応の速度パラメータを計算した。式(7)に示した変形した反応速度式に転化率データを代入してプロット図を作成すれば、勾配と切片から $E$ と $n$ が算出できる。 $A$ は最小二乗法で計算する。図2にカラマツ 5K(1)の実験結果を基に作成したプロット図を示す。

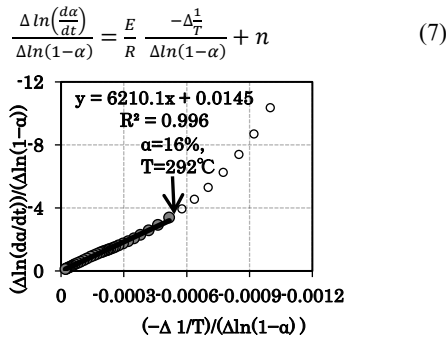


図2 カラマツ 5K(1)のプロット図

計算で求めた速度パラメータを反応速度式に代入し、実験で測ったTG曲線と比較する。図3にジャラ、セラガンバツ、カラマツ、ヒノキのTG曲線の実験値と解析値の比較を示す[2]。軟木類の熱分解反応では単一過程の反応式で再現できるが、堅木類の熱分解反応では単一過程の反応式では精度良く予測できないことがわかった。

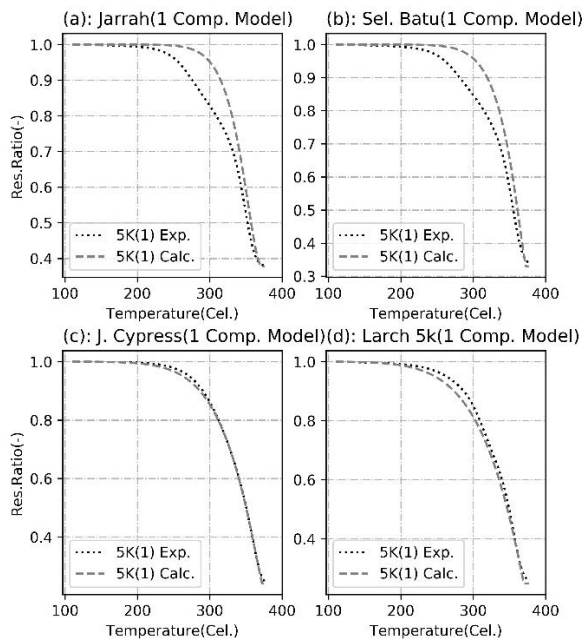


図3 解析値と実験値の比較(単一過程モデル)

### 3.5 三成分モデルによる熱分解モデル化

三成分モデルで熱分解反応をモデル化する際は反応速度の実験値と反応速度式で求めた解析値の残差二乗

和が最小になるように最適化計算で三成分の速度パラメータを求めた。計算を行う際、110~900°CのTG実験全過程のデータを使用した。

図4にジャラ、セラガンバツ、カラマツ、ヒノキのTG曲線の実験値と解析値の比較結果を示す。110~380°Cの区間において、反応速度の解析値が実験値を正確に表現することができる。380°C以上の範囲では実験値と解析値で若干の差が生じた。

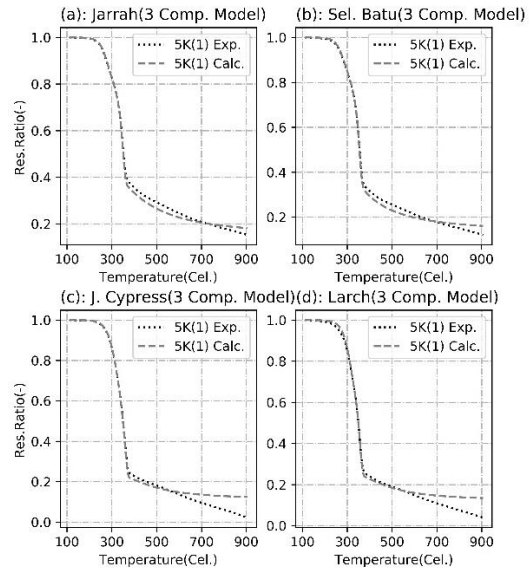


図4 解析値と実験値の比較(三成分モデル)

## 4. 多種類木質部材の加熱時収縮測定

### 4.1 実験目的

加熱された木材は熱分解により寸法収縮が発生し、亀裂の原因となる。解析モデルでは、寸法収縮は亀裂の計算で使用されるため、熱分解による質量減少量と寸法収縮量の関係を解明する必要がある。

### 4.2 実験方法

スギとカラマツ試験体を定温加熱炉で異なる温度において加熱し、加熱前後の質量と寸法変化を測定した。図5に実験で使用するスギとカラマツ試験体の寸法を示す。

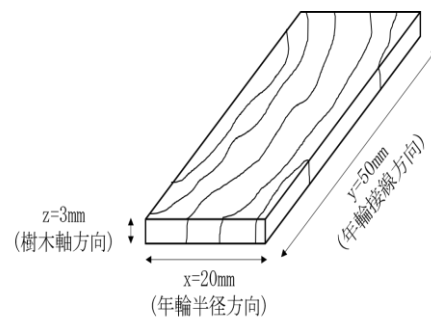


図5 試験体寸法

質量の測定は精度が0.0001gの電子天秤を使用した。寸法の測定はノギスと非接触式3D形状測定機を使用した。

### 4.3 収縮率の定式化

測定した質量減少と三方向の寸法収縮のデータから収縮率  $S$  (収縮した寸法が全体の寸法における比率) と転化率  $C$  (反応した質量が全体の質量における比率) を計算し、 $S$  を横軸、 $C$  を縦軸にプロット図を作成した。図 6 にカラマツのプロット図を示す。カラマツの方向の収縮率と転化率は概ね二次関数の関係になることが分かった。これは、Davidsson ら[5]がカバノキに対する加熱実験で得た結果と同じである。

回帰係数  $\sigma$  については、年輪の半径方向(x)と接線方向(y)の係数は概ね一致し、軸方向(z)の 2 倍であることが分かった。

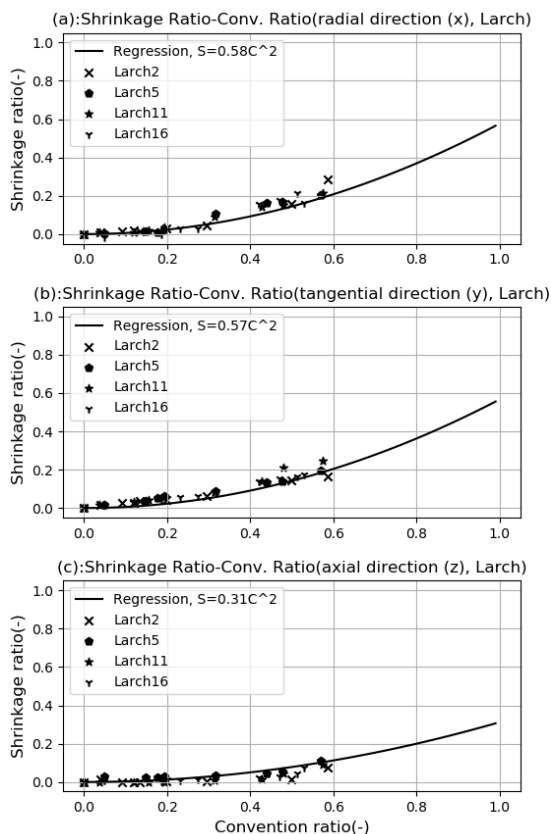


図 6 カラマツの転化率と寸法収縮率

## 5. 亀裂寸法予測式の作成

### 5.1 実験の目的

加熱により木材表面で生成する炭化層の熱伝導率は未分解の木材より低く、内部の木材を断熱して保護する性能がある。しかし、炭化層の収縮により表面で亀裂が発生すると、内部の木材に熱流が伝達しやすくなる。数値解析の境界条件を明確するため、亀裂の寸法を明確に予測する必要がある。

### 5.2 測定方法

茶谷[6]の研究で行ったコーンカロリメーター (CCM) 加熱試験の試験後の試験体を測定の対象とした。試験体は、厚さ 50mm、加熱面寸法が 100 x 100mm と 100 x 50mm のカラマツ集成材である。図 7

に試験体の一例を示す。破線で囲まれた部分が亀裂である。

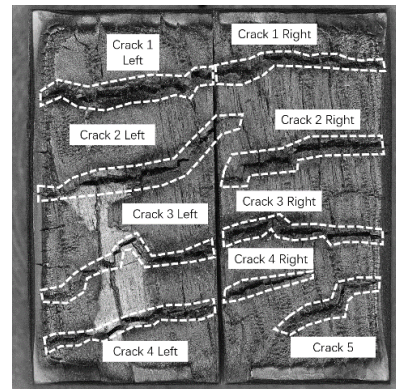


図 7 試験体例の表面写真(i-30(S))

測定をする際は、亀裂の深さ  $H$ 、亀裂幅  $d$  と亀裂間隔  $L$  を測定した。図 8 に亀裂寸法の定義を示す。測定には、非接触式 3D 形状測定機を使用した。

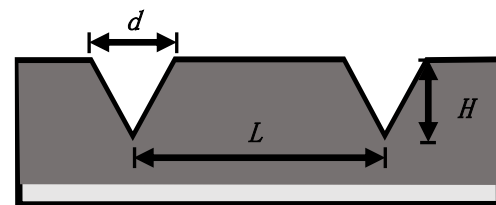


図 8 亀裂寸法の定義

### 5.3 測定結果と予測式

測定で得た亀裂深さを縦軸、亀裂幅を横軸にプロットした。加熱強度、加熱面種類(柾目、板目)と加熱時間を基準としてデータを分類し、加熱条件の違いが亀裂深さ-幅へ及ぼす影響を検討した。

図 9 に加熱面種類で分類した亀裂深さ-幅比の分布図を例として示す。板目面と柾目面では亀裂深さ-幅比に平均で約 20% の差がみられた。

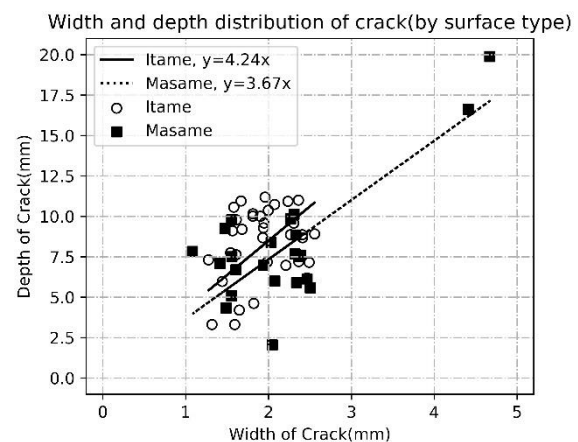


図 9 加熱面種類で分類した亀裂深さ-幅比

加熱条件の交互作用の亀裂深さ-幅比への影響を検討するため、測定した亀裂深さ-幅比のデータに対して分散分析を行った。分析で深さ-幅比に対する影響は有意差がある要因を用いて、式(8)の亀裂寸法予測

式を作成した。

$$r_{calc} = \theta_1 H^2 + \theta_2 H + \theta_3 Su + \theta_4 H Su T + \theta_5 \quad (8)$$

ただし、 $r_{calc}$ は亀裂の深さ-幅比の予測値[-]、 $H$ は加熱強度 [kW/m<sup>2</sup>]、 $Su$ は板目=2, 柱目=1 で定量化した加熱面の種類 [-]、 $T$ は加熱時間[s]、 $\theta_1 \sim \theta_5$ は表1に示した回帰係数である。

表1 式(9)に示す $\theta_1 \sim \theta_5$ の回帰係数

係数名	$\theta_1$	$\theta_2$	$\theta_3$
値	$-2.66 \times 10^{-3}$	$1.99 \times 10^{-1}$	$5.31 \times 10^{-2}$
係数名	$\theta_4$	$\theta_5$	
値	$-1.84 \times 10^{-6}$	1.28	

亀裂間隔に対しては、亀裂幅-深さ比と同じ方法で分析した。その結果、加熱強度、加熱時間、加熱面種類及びそれらの交互作用のいずれも亀裂間隔への影響は統計的有意性がなかった。そのため、亀裂間隔は加熱条件によらず一定であると考えた。

## 6. カラマツ部材に対する燃え止まり解析

### 6.1 解析の概要

作成した木材熱分解反応速度式と実験で測定した収縮係数および亀裂寸法を、既存の燃え止まり解析プログラム[1]に実装し、中上ら[7]が行ったカラマツ壁に対する耐火試験を条件として解析を行った。熱分解反応速度を実装したプログラム(熱分解モデル)と従来の伝熱律速で熱分解反応を処理したプログラム(伝熱モデル)の解析結果を実験結果と比較した。

### 6.2 解析の結果

図10に熱分解モデルで得た解析終了時の解析域形状分布と実験結果の比較を示す。線で描かれた形状は解析終了時の解析域形状の計算値である。解析域形状計算値の上に示した点線と実線はそれぞれ0.246と0.95の等残量比線であり、それぞれ炭化部分と変色部分、変色部分と未分解部分の境界線を表す。また、解析域形状の下方限界は図10に示した座標で表すと約 $y = -60\text{mm}$ にあり、それは焼失部分と炭化部分の境界である。三つの境界線位置の解析値は写真の上に標記した実験値を再現できた。

## 7. 結論

多種類木材の耐火性能(燃え止まり性能)を数値解析で予測可能とするため、以下の内容に対して研究を行った。

4種類の堅木と5種類の軟木の熱重量分析の結果から熱分解反応速度パラメータを計算し、単一過程反応モデルと三成分反応モデルの二種類の反応モデルから反応速度式で熱分解速度を表した。算出した速度パラメータは数値解析により多種類の木材に対する耐火性能予測をする時に使用できる。

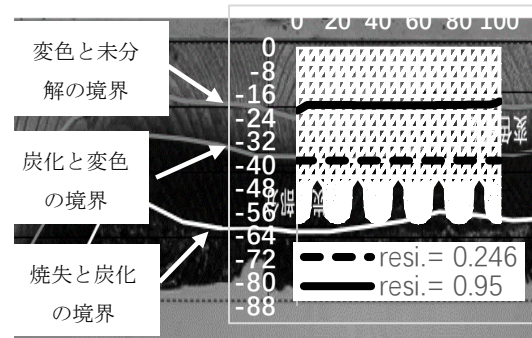


図10 解析終了時の解析域形状実験値と計算値  
カラマツとスギの小片に対して定温加熱を行い、加熱時の熱分解による質量減少と寸法収縮を測定し、質量減少と寸法収縮の関係を検討した。カラマツとスギの収縮率と転化率は概ね二次関数の関係であり、既往の Davidsson ら[5]がカバノキに対する加熱実験で得た結論と一致でした。年輪接線方向と年輪半径方向の係数は概ね同一で、軸方向の収縮係数の2倍である。また、カラマツの収縮係数はスギの収縮係数より小さい。

茶谷ら[6]が行ったカラマツ CCM 加熱実験の試験体を使用し、試験体の亀裂寸法(亀裂深さ-幅比と亀裂間隔)を測定した。測定結果を用いて分散分析を行い、有意な要因を用いて亀裂深さ-幅比の予測式を作成した。作成した予測式は、平均17%の誤差で亀裂深さ-幅比を予測できる。また、分散分析により加熱条件が変わっても亀裂間隔には影響が少ないことを示した。

熱分解モデル化の結果、測定した収縮係数と亀裂寸法の予測式を用いて燃え止まり予測プログラム[1]に実装し、既往のカラマツ壁に対する耐火試験[7]に対して解析を行った。熱分解モデルを実装した燃え止まりプログラムは、実験で測定した炭化と焼失、変色と炭化、未分解と変色部分の境界線位置を再現できた。

## 参考文献

- [1] (一社)性能基準推進協会 木造耐火燃え止まりWG, 2014.
- [2] 孫安陽, 原田和典, 仁井大策, and 山口純一, 日本火災学会論文集(投稿中), 2020.
- [3] C. Di Blasi, *Prog. Energy Combust. Sci.*, vol. 34, pp. 47–90, 2008.
- [4] E. S. Freeman and B. Carroll, *Journal of Physical Chemistry*, vol. 62, no. 4, pp. 394–397, 1958.
- [5] K. O. Davidsson and J. B. C. Pettersson, *Fuel*, vol. 81, no. 3, pp. 263–270, 2002.
- [6] Y. Chatani, K. Harada, and T. Tsuchihashi, *J. Environ. Eng.*, vol. 82, no. 736, pp. 491–499, 2017.
- [7] 中上一成., 斎藤悠輔, 土橋常登, 阪口明弘, 田坂茂樹, and 原田和典, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2006.